

مهندسی عمران فردوسی

https://civil-ferdowsi.um.ac.ir/



بررسی عددی رفتار لرزه‌ای سیستم دیوار بتنی پس‌کشیده مرکزگرا دارای میراگر اصطکاکی*

مقاله پژوهشی

DOI: 10.22067/jfcei.2022.71012.1044

سینا حیرانی‌مقدم[1]   احمد شوشتری[2] 

چکیده *طراحی لرزه‌ای سازه‌ها باید به نحوی صورت گیرد که هزینه‌های تعمیر سازه پس از وقوع زلزله به حداقل برسند. سیستم‌های مرکزگرا هم‌چون دیوار بتنی پس‌کشیده این هدف را تأمین می‌کنند. در این پژوهش برای مقایسه رفتار لرزه‌ای سیستم پیشنهادی دیوار بتنی پس‌کشیده دارای میراگر اصطکاکی با سیستم دیوار بتنی پس‌کشیده دارای میلگردهای مستهلک‌کننده و دیوار برشی بتنی معمولی، سه سیستم مذکور در ساختمان‌های سه، شش و ده طبقه با استفاده از نرم‌افزار OpenSees تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای و تحلیل تاریخچه‌زمانی قرار می‌گیرند. ضریب جذب انرژی در مجموع چرخه‌های بارگذاری اعمالی در دیوار بتنی پس‌کشیده دارای میراگر اصطکاکی برای سازه‌های سه، شش و ده طبقه به‌ترتیب ۱/۳۷، ۱/٤۰ و ۲/۰۲ برابر دیوار بتنی پس‌کشیده دارای میلگردهای مستهلک‌کننده و ۱/۱۵، ۱/۰۵ و ۱/۷۲ برابر دیوار برشی بتنی معمولی است. تحت اثر هفت رکورد زلزله اعمالی میانگین جابه‌جایی جانبی نسبی حداکثر طبقات پایین در سیستم دیوار برشی بتنی معمولی کمتر از دو سیستم دیگر و میانگین جابه‌جایی جانبی نسبی حداکثر در طبقات بالا در سیستم دیوار بتنی پس‌کشیده دارای میراگر اصطکاکی کمتر از سایر سیستم‌ها است.*

واژه‌های کلیدی دیوار بتنی پس‌کشیده مرکزگرا، میراگر اصطکاکی، میلگردهای مستهلک‌کننده، بارگذاری چرخه‌ای، تحلیل تاریخچه‌زمانی.

Numerical Investigation of the Seismic Behavior of Self-centering Post-tensioned Concrete Wall System with Friction-based Damper

Sina Heyrani Moghaddam   Ahmad Shooshtari

Abstract The seismic design of buildings ought to be done to decrease the expenses of building repairing after an earthquake. Self-centering systems such as the post-tensioned concrete wall can provide this purpose. In this study, to evaluate the seismic behavior of the post-tensioned concrete wall with friction-based damper (FBD), the proposed system, the post-tensioned concrete wall with energy dissipator (ED) bars, and the concrete shear wall are subjected to the cyclic and nonlinear response history analyses at three, six, and ten-story buildings using OpenSees software. Based on the cyclic analysis, the total energy dissipation coefficients for the post-tensioned concrete wall with FBD in three, six, and ten-story buildings are respectively 1.37, 1.40, and 2.02 times of that obtained for the post-tensioned concrete wall with energy dissipator bars system, and are respectively 1.15, 1.05, and 1.72 times of that achieved for the concrete shear wall system. According to the results of the applied seven earthquake records, the average of the maximum drift in the concrete shear wall system is less than the other systems in the lower floors, and the average of the maximum drift in the upper floors in the post-tensioned concrete wall with FBD is less than the other systems.

Keywords Self-centering post-tensioned concrete wall, Friction-based damper, Energy dissipators bars, Cyclic loading, Nonlinear response history analysis.

* تاریخ دریافت مقاله ۱٤۰۰/۳/۲٦ و تاریخ پذیرش آن ۱٤۰۱/۵/۱ می‌باشد.

(۱) دکتری، گروه مهندسی عمران - گرایش سازه، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

(۲) نویسندهٔ مسئول، استادیار، گروه مهندسی عمران - گرایش سازه، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

Email: ashoosht@um.ac.ir

مقدمه

ساختمان‌هایی که بر اساس آیین‌نامه‌های رایج طراحی می‌شوند، معمولاً دارای تغییرمکان دائمی در انتهای زلزله‌های شدید می‌باشند که این جابه‌جایی نسبی باقی‌مانده باعث ایجاد هزینه‌های اقتصادی و خطرات ایمنی برای ساکنان می‌شود. در سال‌های اخیر محققان و پژوهشگران سیستم نوینی را پیشنهاد کردند که قادر است پس از وقوع زمین‌لرزه به موقعیت اولیه خود بازگشته و خسارت‌های وارده به سازه را به حداقل برساند. از این رو استفاده از سیستم‌های مرکزگرا به‌عنوان سیستم باربر جانبی که با فراهم کردن نیروی بازگرداننده باعث بازگشت سازه به وضعیت اولیه آن می‌شود، این هدف را تأمین می‌کند. یکی از سیستم‌های کاربردی مرکزگرا، دیوار بتنی پس‌کشیده می‌باشد که در این سیستم کابل‌های پس‌کشیده قائم نیروی بازگرداننده موردنظر را فراهم می‌کند.

اولین بار در سال ۱۹۹۳ پریستلی و تاوو [1] استفاده از سیستم قاب خمشی بتنی پیش ساخته‌ی مرکزگرایی را که اتصالات آن کابل‌هایی پیش‌تنیده بود، پیشنهاد کردند. استانتون و همکاران[2] نیز یک سیستم دوگانه را معرفی کردند که آرماتورهای فولاد نرمه با کابل‌هایی غیرچسبنده در اتصالات بحرانی ترکیب شده بود. علت استفاده از آرماتورهای فولاد نرمه، استهلاک انرژی چرخه‌ای سیستم بود. استانتون و ناکاکی یک سیستم دیوار پیش‌تنیده‌ی پیش‌ساخته را معرفی کردند که در آن پانل‌های دیوار به‌صورت جداگانه در کنار یکدیگر قرار داشتند تا اجازه‌ی حرکت گهواره‌ای به هر کدام از پانل‌ها داده شود. در این سیستم، وزن هر پانل نیروی لازم مرکزگرایی را فراهم می‌کرد. هم‌چنین در این سیستم در صورتی که وزن دیوارها برای برگشت به نقطه اولیه کافی نباشد، استفاده از کابل‌های پس‌کشیده که دیوارها را به پی متصل می‌کند پیشنهاد شده‌است. از سویی دیگر متصل‌کننده‌های برشی شکل‌پذیر در بین دیوارها برای استهلاک انرژی در این سیستم پیشنهاد شده‌است[3]. رسترپو[4] بر اساس سیستم پیشنهادی استانتون و ناکاکی سیستم دیوار طره‌ای بتنی پیش‌تنیده دارای کابل‌های پس‌کشیده و میلگردهای نرمه برای جذب انرژی را پیشنهاد داد. ویژگی اصلی این سیستم ظرفیت جابه‌جایی جانبی بالا و کمتر بودن خسارت سازه‌ای بود. در سال ۲۰۰۷ رفتار مرکزگرای دیوار بتنی پیش‌ساخته دارای کابل غیرچسبنده توسط ارکمن و اسکولتز مورد بررسی قرار گرفت. نتیجه‌ی این پژوهش نشان می‌دهد که نحوه‌ی توزیع کابل‌های پس‌کشیده در دیوار اثر ناچیزی بر رفتار چرخه‌ای این سیستم دارد ولی آرایش این کابل‌ها بر سختی جانبی و ظرفیت جذب انرژی دیوارها تأثیرگذار می‌باشد[5]. هم‌چنین بر اساس مدل تحلیلی ارائه شده توسط این دو محقق، قراردادن کابل‌های پس‌کشیده در انتهای دیوار باعث کاهش جابه‌جایی نسبی دیوار تحت اثر بارهای جانبی می‌شود[6].

خان‌محمدی و حیدری[7] با استفاده از نرم‌افزار OpenSees چهار ساختمان هشت، دوازده، شانزده و بیست طبقه دارای سیستم دیوار بتنی مرکزگرا را نسبت‌به کردند که در آن قطعات مختلف دیوار بتنی در ارتفاع با استفاده از میلگردهای فولادی نرمه به یکدیگر متصل می‌شوند. در این مقاله مدل‌های مورد بررسی تحت اثر تحلیل تاریخچه‌ی پاسخ قرار گرفت که با بررسی پاسخ‌ها مشخص گردید که قرار دادن کابل پس کشیده در قسمت میانی و میلگردهای فولادی نرمه در موقعیت ۱۰ درصدی طول دیوار نسبت‌به انتهای آن، مؤثرترین محل است و این چیدمان باعث ثابت ماندن شتاب افقی در ارتفاع دیوار تحت اثر بارهای جانبی می‌شود. هم‌چنین بررسی منحنی‌های چرخه‌ای نشان می‌دهد با افزایش قطعات دیوار در ارتفاع نسبت‌به حالتی که دیوار به‌صورت یک سره اجرا شود، درصد جذب انرژی افزایش می‌یابد. شاه پوری و تسنیمی به تحلیل غیرخطی یک نمونه دیوار برشی ترکیبی بتن مسلح پیش‌ساخته دارای بازشو در نرم افزار اجزای محدود پرداختند [8]. گئو و همکاران[9] استفاده از غلاف‌های فولادی در دو پاشنه دیوار بتنی پس‌کشیده برای جلوگیری از خرد شدن بتن در این نواحی را پیشنهاد دادند. هم‌چنین در سیستم پیشنهادی گئو و همکاران ستون‌هایی فولادی به همراه میراگرهای فلزی برای جذب بیشتر انرژی مورد استفاده قرار گرفته است.

در سال ۲۰۱۶ یک سیستم دیوار بتنی مرکزگرا شامل دیوار پیش‌ساخته به‌همراه ستون‌های انتهایی توسط هنری و همکاران مورد بررسی قرار گرفت. در این مدل دیوار بتنی با استفاده از تعدادی قطعات فلزی O شکل به ستون‌های اطراف دیوار متصل شده و به دیوار اجازه بلند شدن از پی داده می‌شود. نتایج این کار پژوهشی نشان می‌دهد که افزایش تعداد اتصالات O شکل و کاهش نیروی پیش‌تنیدگی کابل باعث افزایش جذب انرژی و کاهش خرابی پای دیوار می‌شود. هم‌چنین محدود کردن نیروی

محوری دیوار به کمتر از ۱۰ درصد ظرفیت محوری دیوار باعث بهبود رفتار دیوار و کاهش خسارت آن می‌شود[10]. در سال ۲۰۱۷ پژوهشی بر روی دیوار بتنی مرکزگرای دارای میراگر اصطکاکی توسط گئو و همکاران صورت گرفت. بر اساس تحلیل‌های دینامیکی صورت گرفته، سیستم پیشنهادی عملکرد لرزه‌ای بهتری نسبت‌به دیوار بتنی مرکزگرای ترکیبی داشته و ظرفیت تغییرشکل بالاتر و جابه‌جایی جانبی نسبی پسماند کمتری دارد[11]. شاه‌پوری و تسنیمی[12] دو نمونه دیوار برشی پیش ساخته‌ی ترکیبی مرکزگرا رو مورد آزمایش قرار دادند و نتایج آزمایشگاهی رو با مدل‌های اجزا محدود مورد مقایسه قرار دادند که نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌های عددی، تطبیق بسیار خوبی با نتایج آزمایشگاهی داشته‌است. وانگ و ژو دیوارهای بتنی دارای میله‌های آلیاژی حافظه‌دار شکلی را مورد بررسی قرار دادند. بر اساس این مطالعه، دیوارهای بتنی دارای میله‌های SMA دارای خواص سیستم مرکزگرا و دارای ظرفیت جذب انرژی مناسبی هستند[13]. گئو و همکاران [14] در سال ۲۰۱۸ دیوار بتنی پس-کشیده دارای میراگرهای اصطکاکی در میانه دیوار را مورد آزمایش و بررسی قرار دادند. آن‌ها هم‌چنین برای جلوگیری از خرد شدن بتن پای دیوار از غلاف‌های فولادی استفاده نمودند. هم‌چنین میراگر فولادی S شکل پیشنهاد و مورد مطالعه عددی و آزمایشگاهی قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد رفتار چرخه‌ای این میراگرها پایدار و جذب انرژی مناسبی دارند[15]. شیرین‌کام و رزاقی[16] نیز میراگر قوطی شکل را مورد بررسی قرار دادند. نتایج پژوهش شکل‌پذیری بالای نمونه‌های مورد بررسی را در کشش و فشار نشان می‌دهد. ژیاوو و همکاران [17-18] دیوار برشی مرکزگرا دارای دیسک‌های فنری در پای دیوار بتنی را پیشنهاد دادند. سیستم پیشنهادی باعث کاهش خسارت به دیوار برشی بتنی و کاهش جابه‌جایی نسبی باقی‌مانده می‌شود . دوو و همکاران[19] میراگر اصطکاکی در پای دیوار بتنی مرکزگرا را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش تأثیر عواملی همچون ضخامت ورق اتصال میراگر، قطر بولت‌های میراگر و مقدار نیروی اصطکاک میراگر بر عملکرد لرزه‌ای سیستم مورد بررسی قرار گرفت. در پژوهش صورت گرفته توسط حیرانی مقدم و شوشتری[20] رفتار غیرخطی مدل عددی دیوار بتنی پس‌کشیده مرکزگرا دارای میراگر تسلیمی شکاف‌دار مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج این مطالعه سیستم موردنظر افت مقاومت کمتر و شکل‌پذیری بالاتری نسبت‌به سیستم بتنی پس‌کشیده مرکزگرا دارای میلگردهای مستهلک‌کننده دارد.

در این پژوهش رفتار لرزه‌ای مدل عددی سیستم پیشنهادی دیوار بتنی پس‌کشیده دارای میراگر اصطکاکی با سیستم دیوار بتنی پس‌کشیده دارای میلگردهای مستهلک‌کننده و دیوار برشی بتنی معمولی، به‌صورت ساختمان‌های سه، شش و ده طبقه با استفاده از نرم‌افزار OpenSees مورد مقایسه قرار می‌گیرد. بدین منظور مدل‌های عددی موردنظر تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای و تحلیل تاریخچه‌زمانی قرار می‌گیرند.

روش تحقیق

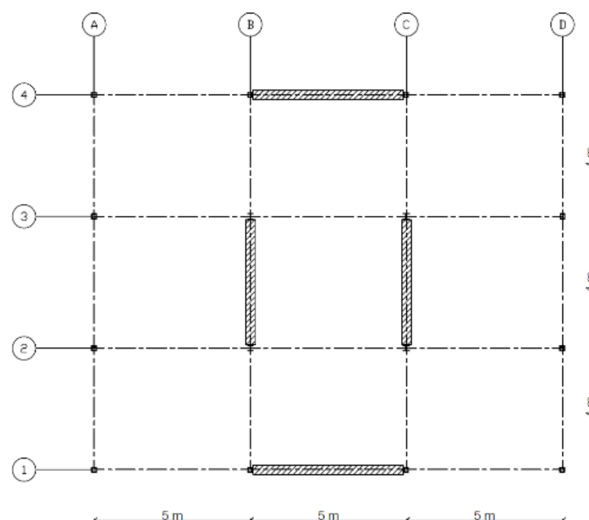
در این پژوهش سیستم پیشنهادی دیوار بتنی پس‌کشیده مرکزگرا دارای میراگر اصطکاکی، سیستم دیوار بتنی پس‌کشیده مرکزگرا دارای میلگردهای مستهلک‌کننده و دیوار برشی بتنی معمولی به‌صورت قاب‌های سه، شش و ده طبقه نسبت‌به شده‌است. مدل‌های مذکور تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای و تحلیل تاریخچه‌زمانی قرار گرفته‌است. هدف از انجام این پژوهش بررسی اثر میراگر اصطکاکی بر رفتار سیستم دیوار بتنی پس‌کشیده مرکزگرا و مقایسه پارامترهای لرزه‌ای این سیستم با سیستم‌های دیوار بتنی پس‌کشیده مرکزگرا دارای میلگردهای مستهلک‌کننده و دیوار برشی بتنی معمولی می‌باشد. در ادامه به معرفی مدل‌های مورد بررسی پرداخته می‌شود.

معرفی مدل‌ها

برای بررسی رفتار لرزه‌ای سیستم پیشنهادی دیوار بتنی پس-کشیده مرکزگرا دارای میراگر اصطکاکی (Friction-based dissipative devices)، سیستم مذکور با سیستم دیوار بتنی پس-کشیده مرکزگرا دارای میلگردهای مستهلک‌کننده (Energy dissipators bars) و سیستم دیوار برشی بتنی معمولی، به‌عنوان سیستم‌های باربر جانبی به‌همراه قاب ساده فولادی به‌صورت ساختمان‌های سه، شش و ده طبقه مورد مقایسه قرار می‌گیرند. در ادامه مشخصات این سازه‌ها و نحوه نسبت‌به آن‌ها بیان می-شود.

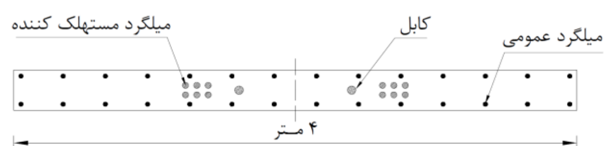
مشخصات سازه‌های مورد بررسی. بارگذاری سازه‌های مورد بررسی بر اساس کاربری مسکونی و مطابق آیین‌نامه ASCE7 [21] و طراحی مقاطع تیر و ستون مطابق آیین‌نامه AISC [22]

صورت گرفته‌است. هم‌چنین طراحی لرزه‌ای سازه‌ها (طراحی دیوار برشی به‌عنوان سیستم باربر جانبی) بر اساس گروه طراحی لرزه‌ای D انجام شده‌است[21]. پلان ساختمان‌های مورد بررسی مطابق شکل (۱) می‌باشد. ارتفاع طبقات در کلیه سازه‌ها ٤ متر است. هم‌چنین برای طراحی دیوار برشی پس‌کشیده مرکزگرا و محاسبه سطح مقطع کابل‌ها و میلگردهای مستهلک‌کننده از روش معرفی شده در پژوهش یانگ و لو [23] استفاده شده‌است.

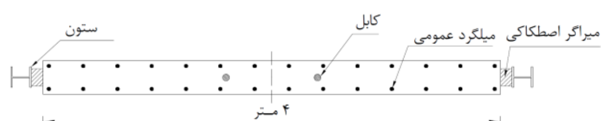


شکل ۱ پلان سازه‌های مورد بررسی

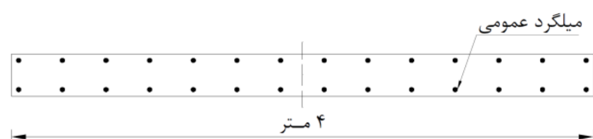
برای مقایسه رفتار سه نوع سیستم مذکور قاب B در نرم‌افزار OpenSees [24] نسبت‌به شده‌است. موقعیت قرارگیری کابل‌ها، میلگردهای مستهلک‌کننده پای دیوار و میلگردهای عمومی دیوار بتنی پس‌کشیده مرکزگرا دارای میلگردهای مستهلک‌کننده نیز در شکل (۲) نمایش داده شده‌است. کابل‌ها و میلگردهای مستهلک‌کننده در مقطع دیوار بتنی پس‌کشیده در محدوده توصیه شده یانگ و لو [23] قرار داده شده‌است. سطح مقطع دیوار بتنی پس‌کشیده مرکزگرا دارای میراگر اصطکاکی مشابه شکل (۳) بوده که در دو سمت دیوار ستون فولادی قرار دارد و در هر طبقه میان دیوار بتنی پس‌کشیده و ستون‌ها از چهار عدد میراگر اصطکاکی در فواصل مساوی با یکدیگر استفاده می‌شود. در این سیستم نسبت‌به سیستم دیوار بتنی پس‌کشیده مرکزگرا دارای میلگردهای مستهلک‌کننده، میلگردهای مستهلک‌کننده در پای دیوار حذف شده‌است. شایان ذکر است در این دو سیستم اتصال دیوار به پی به نحوی می‌باشد که دیوار تحت اثر بارهای جانبی دارای حرکت گهواره‌ای می‌باشد. سطح مقطع دیوار بتنی معمولی نیز مطابق شکل (٤) می‌باشد.



شکل ۲ سطح مقطع دیوار بتنی پس‌کشیده مرکزگرا دارای میلگردهای مستهلک‌کننده

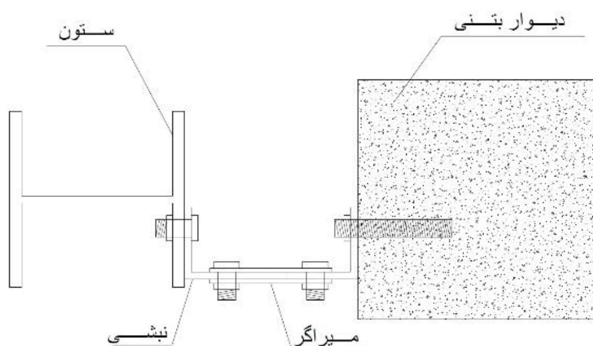


شکل ۳ سطح مقطع دیوار بتنی پس‌کشیده مرکزگرا دارای میراگر اصطکاکی



شکل ٤ سطح مقطع دیوار برشی بتنی

کابل‌های دیوار بتنی پس‌کشیده درون داکت‌هایی با قطر بزرگتر از قطر کابل که درون دیوار تعبیه شده‌است قرار می‌گیرد. ابتدا و انتهای کابل در فونداسیون و تراز بالای دیوار مهار می‌شود. هم‌چنین میلگردهای دیوار به درون فونداسیون متصل نمی‌باشد و بتن‌ریزی دیوار مجزا از فونداسیون صورت می‌گیرد تا امکان بلند شدن دیوار در برابر بارهای جانبی فراهم گردد. در شکل (۵) نحوه اتصال میراگر اصطکاکی در سیستم پیشنهادی نمایش داده می‌شود.



شکل ۵ نحوه اتصال میراگر اصطکاکی در سیستم پیشنهادی

جدول ۱ مشخصات دیوارها و آرماتورگذاری آن

مدل	شماره طبقه	میلگرد عمومی	ضخامت دیوار (متر)	مقاومت بتن دیوار(مگاپاسکال)
سه طبقه	۲،۳	ϕ12@30	۰,۲۵	۲۰
	۱	ϕ16@30		
شش طبقه	٦	ϕ12@30	۰,۳۵	۳۰
	۵	ϕ16@30		
	۳،٤	ϕ22@30		
	۲	ϕ25@30		
	۱	ϕ28@30		
ده طبقه	۱۰	ϕ12@30	۰,٤۵	٤۵
	۹	ϕ16@30		
	۷،۸	ϕ22@30		
	٦	ϕ25@30		
	٤،۵	ϕ28@30		
	۱،۲،۳	ϕ32@30		

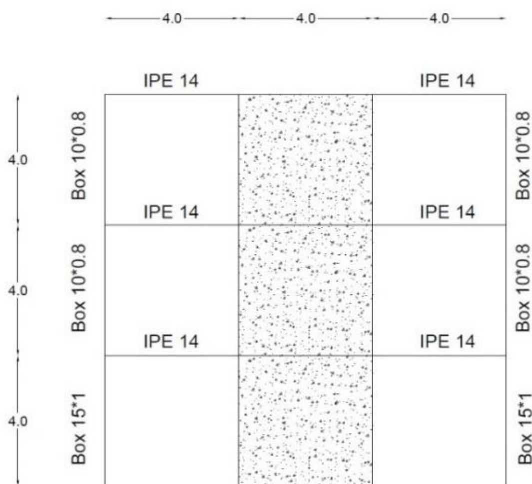
جدول ۲ مشخصات ستون‌ها و تیرهای قاب‌های مجاور

مدل	شماره طبقه	مقطع ستون	مقطع تیر
سه طبقه	۲،۳	Box 10×0.8	IPE 14
	۱	Box 15×1	
شش طبقه	۵،٦	Box 10×0.8	IPE 14
	٤	Box 15×1	
	۳	Box 25×1.5	
	۱،۲	Box 30×2	
ده طبقه	۹،۱۰	Box 10×0.8	IPE 14
	۸	Box 15×1	
	۷	Box 20×1	
	٦	Box 25×1.5	
	۵	Box 30×2	
	٤	Box 35×2.5	
	۳	Box 40×3	
	۱،۲	Box 45×3.5	

جدول ۳ سطح مقطع مجموع کابل‌ها و میلگردهای مستهلک‌کننده دیوار پس‌کشیده دارای میلگردهای مستهلک‌کننده

مدل	مساحت کابل (سانتی متر مربع)	مساحت میلگردهای مستهلک‌کننده (سانتی متر مربع)
سه طبقه	۸	٤۹/۲
شش طبقه	۱٦	۹۸/٤
ده طبقه	۳۰	۱۷۲/۲

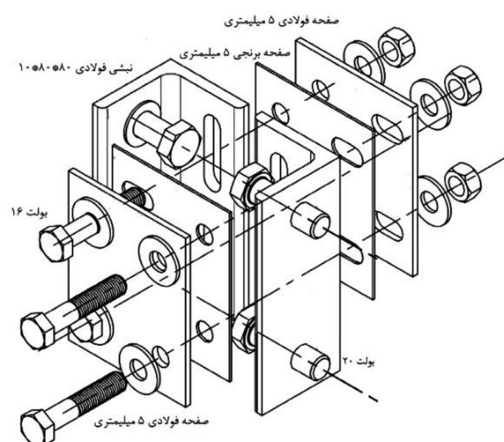
در قاب‌های سه، شش و ده طبقه مشخصات دیوارهای مورد بررسی هم‌چون مقاومت بتن، ضخامت دیوار و میلگردهای عمومی دیوار در جدول (۱) و مشخصات تیر و ستون قاب‌های ساده مجاور دیوار در جدول (۲) بیان شده‌است. هم‌چنین در جدول (۳) سطح مقطع کابل‌ها و میلگردهای مستهلک‌کننده دیوار بتنی پس‌کشیده مرکزگرا دارای میلگردهای مستهلک‌کننده مشخص شده‌است. ذکر این نکته ضروری است، برای انجام مقایسه بهتر رفتار لرزه‌ای میان سه سیستم مذکور، ضخامت و میلگردهای عمومی دیوار، مقاومت بتن و مشخصات قاب‌ها در این سه سیستم یکسان در نظر گرفته شده‌است. قاب سه طبقه دارای دیوار برشی بتنی به‌عنوان نمونه در شکل (٦) نمایش داده شده‌است.



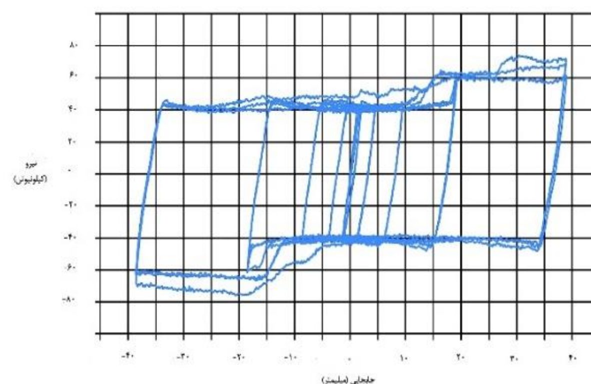
شکل ٦ قاب سه طبقه دارای دیوار برشی بتنی

شایان ذکر است سطح مقطع کابل‌ها در دیوارهای بتنی پس‌کشیده مرکزگرا دارای میراگر اصطکاکی مطابق مشخصات جدول (۳) است که در این سیستم میلگردهای مستهلک‌کننده حذف و برای جذب انرژی از میراگرهای اصطکاکی در دو سمت دیوار در فواصل ۱ متری (در راستای ارتفاع دیوار) استفاده شده‌است. میراگرهای اصطکاکی مورد استفاده در این مطالعه میراگر شماره L29 پژوهش دال‌لاگو و همکاران [25] می‌باشد. این میراگر مطابق شکل (۷) از دو نبشی فولادی و صفحات ۲ و ۵ میلی‌متری فولادی تشکیل شده‌است. رفتار چرخه‌ای این میراگر در شکل (۸) نمایش داده شده‌است.

مشخصات مدل‌های OpenSees. در این مطالعه برای نسبت‌به سه سیستم مذکور به‌صورت قاب‌های سه، شش و ده طبقه از نرم‌افزار OpenSees استفاده شده‌است[24]. در این مدل‌ها المان ShellNLDKGQ برای نسبت‌به دیوار بتنی بکار رفته‌است. هم‌چنین برای نسبت‌به کابل‌ها و میلگردهای مستهلک‌کننده از المان corotTruss و نسبت‌به تیرها و ستون‌ها از المان nonlinearBeamColumn استفاده شده‌است.



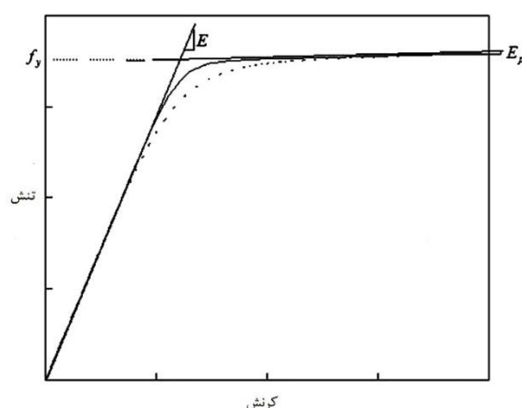
شکل ۷ میراگر اصطکاکی پژوهش دال‌لاگو و همکاران [۲۵]



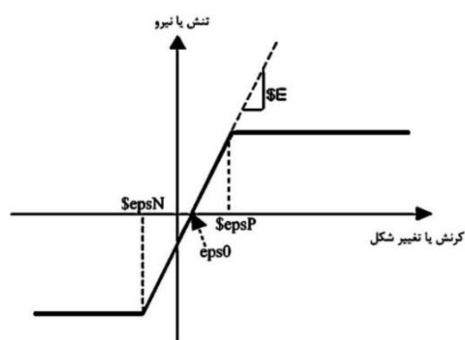
شکل ۸ رفتار چرخه‌ای میراگر اصطکاکی پژوهش دال‌لاگو و همکاران [25]

در مدل‌های مورد بررسی، رفتار مصالح بتنی با استفاده از مصالح PlaneStressUserMaterial به همراه PlateFromPlaneStress معرفی شده در تحقیق لو و همکاران در نظر گرفته شده‌است.[26] هم‌چنین مصالح Steel02 برای نسبت‌به رفتار فولاد تیر، ستون و میلگردهای موجود در دیوار استفاده شده‌است (شکل ۹) . برای نسبت‌به رفتار کابل درون دیوار نیز از مصالح الاستوپلاستیک کامل (uniaxialMaterialElasticPP) استفاده شده‌است که تنها رفتار کششی آن در نظر گرفته شده‌است (شکل ۱۰). هم‌چنین برای درنظر گرفتن تنش اولیه کابل، مصالح کرنش اولیه (InitStrainMaterial) به مصالح الاستوپلاستیک کامل افزوده شده‌است.

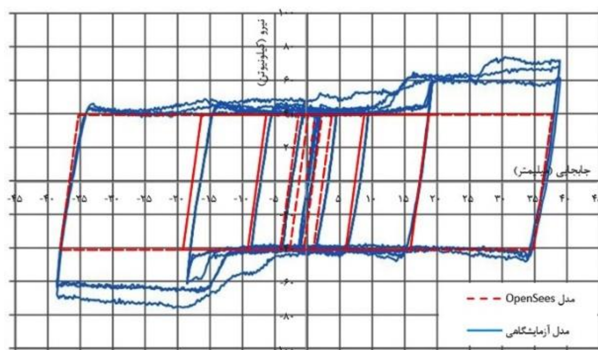
نسبت‌به رفتار چرخه‌ای میراگر اصطکاکی پژوهش دال لاگو و همکاران[25] نیز با استفاده از مصالح Steel01 و تعریف المان twoNodeLink در نرم‌افزار OpenSees مطابق شکل (۱۱) انجام شده‌است. هم‌چنین برای درنظرگرفتن شکست میراگر در جابه‌جایی نسبی بالاتر از ۴۰ میلی‌متر مصالح MinMax به رفتار میراگر فوق‌الذکر افزوده شده‌است.



شکل ۹ مصالح Steel02 در نرم‌افزار OpenSees [۲۴]

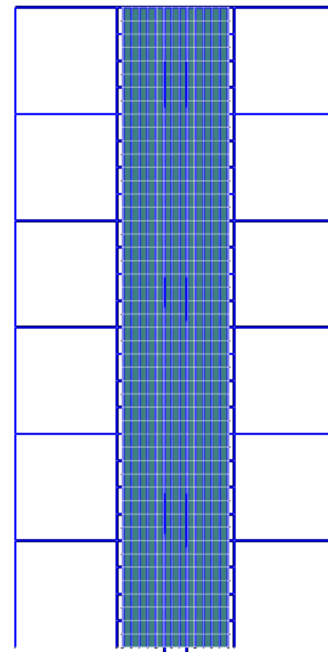


شکل ۱۰ مصالح uniaxialMaterialElasticPP در نرم‌افزار OpenSees [24]



شکل ۱۱ نسبت‌به رفتار چرخه‌ای میراگر اصطکاکی پژوهش دال‌لاگو و همکاران [24] در نرم‌افزار OpenSees

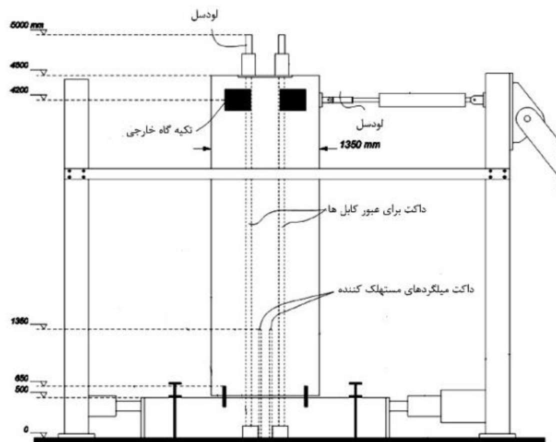
در ادامه به‌عنوان نمونه مدل عددی ساختمان ٦ طبقه با سیستم دیوار بتنی پس کشیده مرکزگرا دارای میراگر اصطکاکی در نرم‌افزار OpenSees در شکل (١٢) نمایش داده شده‌است. در مدل‌های عددی مربوط به سیستم دیوار بتنی پس کشیده، برای ایجاد رفتار مرکزگرا، المان‌های کابل درون دیوار در پای دیوار به‌صورت گیردار درنظر گرفته شده‌است. هم‌چنین اجازه بلند شدن از تکیه‌گاه و ایجاد حرکت گهواره‌ای به المان دیوار داده شده‌است.



شکل ١٢ مدل عددی ساختمان ٦ طبقه با سیستم دیوار بتنی پس کشیده مرکزگرا دارای میراگر اصطکاکی

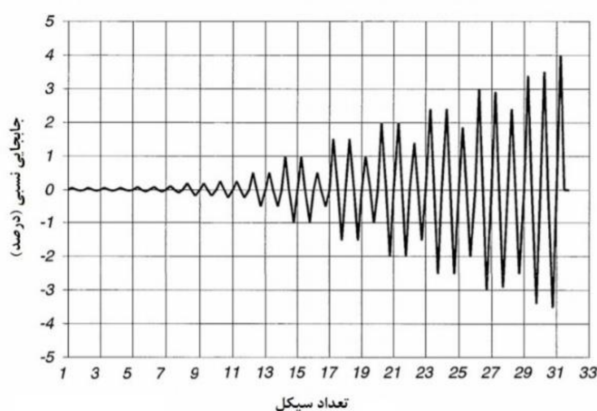
صحت‌سنجی

برای بررسی صحت نسبت‌به دیوار بتنی پس‌کشیده مرکزگرا در نرم‌افزار OpenSees از نتایج آزمایش دیوار شماره سه پژوهش رستریو و رحمان استفاده شده‌است[27]. دیوار مورد مطالعه دارای طول ١٣٥٠ میلی‌متر، ارتفاع ٤٠٠٠ میلی‌متر و ضخامت ١٢٥ میلی‌متر می‌باشد. هم‌چنین مقاومت بتن مورد استفاده برابر با ٣١ مگاپاسکال، تنش کششی حداکثر کابل‌ها ١٨٣٦ مگاپاسکال، تنش جاری شدن میلگردهای فولادی دیوار ٤٣٠ مگاپاسکال و تنش جاری شدن میلگردهای مستهلک‌کننده ٤٦٠ مگاپاسکال است.



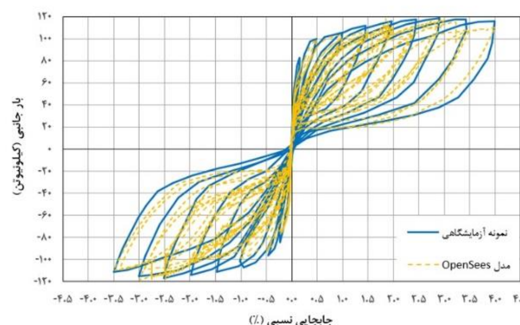
شکل ١٣ برپایی آزمایش رستریو و رحمان[27]

برای نسبت‌به دیوار بتنی پس‌کشیده مرکزگرا در نرم-افزار OpenSees از مصالح بتنی PlaneStressUserMaterial به همراه PlateFromPlaneStress مطابق با مشخصات معرفی شده در آزمایش استفاده شده‌است. المان پوسته استفاده شده در نسبت‌به دیوار نیز از نوع ShellNLDKGQ می‌باشد. هم‌چنین مصالح Steel02 به‌عنوان مصالح فولادی میلگردهای طولی و میلگردهای مستهلک‌کننده بکار رفته در دیوار بتنی پس‌کشیده در نظر گرفته شده‌است. برای نسبت‌به کابل درون دیوار از مصالح الاستوپلاستیک کامل (uniaxialMaterialElasticPP) به‌همراه مصالح کرنش اولیه (InitStrainMaterial) استفاده شده‌است. هم‌چنین برای لحاظ کردن رفتار گهواره‌ای دیوار از المان‌های zeroLength در زیر دیوار استفاده شده‌است. پس از نسبت‌به دیوار بتنی پس‌کشیده مرکزگرا مورد نظر، بارگذاری رفت و برگشتی معرفی شده در گزارش رستریو و رحمان[28] مطابق شکل (١٤) به دیوار اعمال شده‌است.

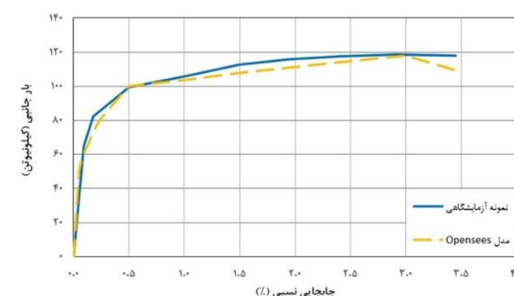


شکل ١٤ بارگذاری اعمالی پژوهش رستریو و رحمان [٢٨]

در ادامه نمودار برش‌پایه در مقابل جابه‌جایی نسبی دیوار بتنی مرکزگرا آزمایش شده تحت اثر بارگذاری رفت و برگشتی با نتایج مدل OpenSees مورد مقایسه قرار می‌گیرد (شکل ۱۵). هم‌چنین در شکل (۱۶) نمودار مقادیر حداکثر برش پایه و جابه‌جایی جانبی نسبی تحت اثر بارگذاری رفت و برگشتی دیوار بتنی مرکزگرا مورد آزمایش و مدل OpenSees نمایش داده شده‌است.



شکل ۱۵ برش پایه در مقابل جابه‌جایی نسبی نمونه آزمایشگاهی و مدل عددی



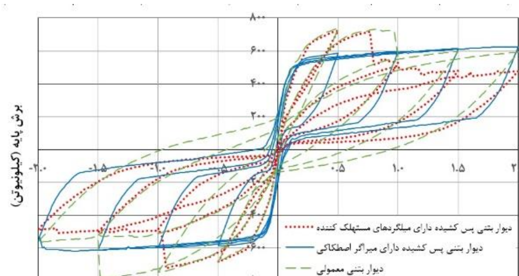
شکل ۱۶ مقادیر حداکثر برش پایه در مقابل جابه‌جایی نسبی نمونه آزمایشگاهی و مدل عددی

هم‌چنین مقادیر انرژی جذب‌شده نمونه آزمایشگاهی و مدل عددی به‌ترتیب برابر با ۸۳۳۵ و ۷٤۷۸ کیلوژول می‌باشد. به عبارت دیگر مقدار انرژی جذب شده مدل OpenSees ۸۹ درصد نمونه آزمایشگاهی است. بررسی نتایج به‌دست‌آمده از نمودارها و مقادیر فوق، دقت قابل قبول نسبت‌به دیوار بتنی پس‌کشیده مرکزگرا در نرم‌افزار OpenSees را نشان می‌دهد.

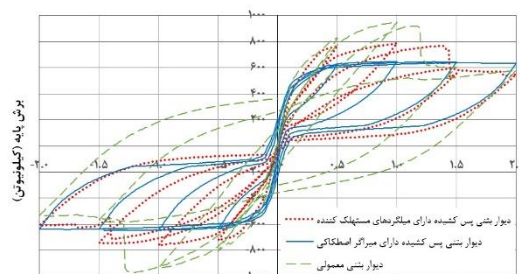
بررسی نتایج

در این پژوهش مدل‌های معرفی شده سه، شش و ده طبقه سیستم دیوار بتنی پس‌کشیده مرکزگرا دارای میلگردهای مستهلک‌کننده، دیوار بتنی پس‌کشیده مرکزگرا دارای میراگر اصطکاکی و دیوار بتنی معمولی تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای و تحلیل تاریخچه‌زمانی قرار می‌گیرند.

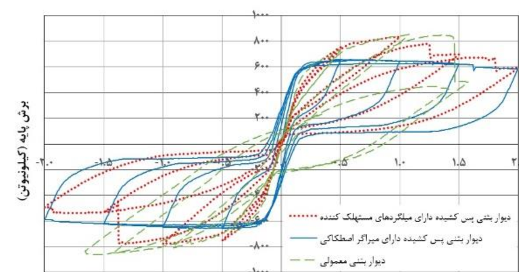
در ابتدا سازه‌های مورد بررسی تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای برای جابه‌جایی‌های بام معادل ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد ارتفاع سازه قرار می‌گیرند. در شکل (۱۷) پاسخ برش پایه کل در برابر جابه‌جایی نسبی بام به‌دست آمده برای سازه‌های سه، شش و ده طبقه نمایش داده می‌شود.



(الف) سازه سه طبقه



(ب) سازه شش طبقه



(پ) سازه ده طبقه

شکل ۱۷ برش پایه در برابر جابه‌جایی نسبی بام در مدل‌های مورد بررسی تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای

مقدار مقاومت نهایی سیستم دیوار بتنی پس‌کشیده مرکزگرا دارای میلگردهای مستهلک‌کننده و دیوار برشی بتنی معمولی در دو چرخه اول نسبت‌به سیستم دیوار بتنی پس‌کشیده مرکزگرا

دارای میراگر اصطکاکی بیشتر بوده، در حالی که در چرخه‌های بعدی این مقدار در سیستم دیوار بتنی پس‌کشیده مرکزگرا دارای میراگر اصطکاکی نسبت‌به دو سیستم دیگر بیشتر است. بر اساس نمودارهای فوق، سیستم دیوار بتنی پس‌کشیده مرکزگرا دارای میلگردهای مستهلک‌کننده و دیوار بتنی معمولی پس از حدود جابه‌جایی جانبی نسبی ۱ درصد دچار افت مقاومت می‌شوند. هم‌چنین مقامت نهایی متناسب با ۲ درصد جابه‌جایی نسبی در سیستم دیوار بتنی پس‌کشیده مرکزگرا دارای میراگر اصطکاکی از دو سیستم دیگر بیشتر است. در ادامه در جدول (٤) مقادیر جابه‌جایی نسبی باقی‌مانده نمونه‌های عددی مورد مطالعه در انتهای بارگذاری چرخه‌ای اعمالی نشان داده می‌شود.

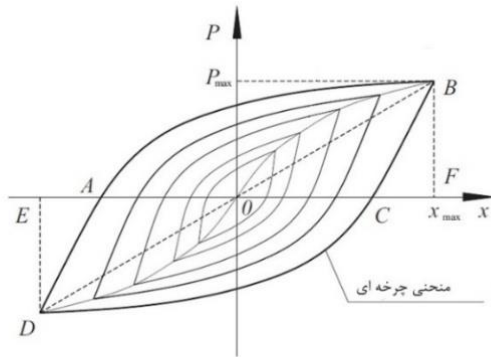
جدول ٤ جابه‌جایی نسبی باقی‌مانده نمونه‌های عددی تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای

سیستم مورد مطالعه	سه طبقه	شش طبقه	ده طبقه
دیوار پس‌کشیده مرکزگرا دارای میلگردهای مستهلک-کننده	۰/۰٤	۰/۰۳	۰/۰۳
دیوار پس‌کشیده مرکزگرا دارای میراگر اصطکاکی	۰/۱۸	۰/۰۸	۰/۱۱
دیوار برشی بتنی معمولی	۰,۹۷	۱/۳۷	۰/۳۳

بر اساس نتایج فوق سیستم دیوار بتنی پس‌کشیده دارای میلگردهای مستهلک‌کننده و دیوار بتنی پس‌کشیده مرکزگرا دارای میراگر اصطکاکی دارای رفتار مرکزگرا بوده و جابه‌جایی نسبی کمتری نسبت‌به سیستم دیوار برشی بتنی دارند. برای بررسی مقدار انرژی جذب شده در بارگذاری‌های چرخه‌ای اعمال شده نیز از ضریب جذب انرژی (E) معرفی شده در پژوهش لو و همکاران [۲۹] مطابق رابطه (۱) استفاده می‌شود.

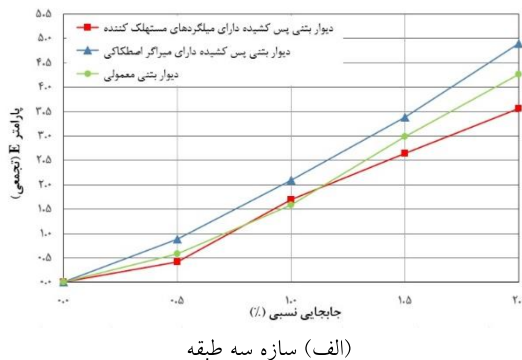
$$E = \frac{S_{ABC} + S_{CDA}}{S_{OBF} + S_{ODE}} \quad (۱)$$

در این رابطه مطابق شکل (۱۸) S_{ABC} و S_{CDA} مساحت محصور بین منحنی‌های چرخه‌ای با محور x و S_{OBF} و S_{ODE} مساحت مثلث‌های OBF و ODE است.

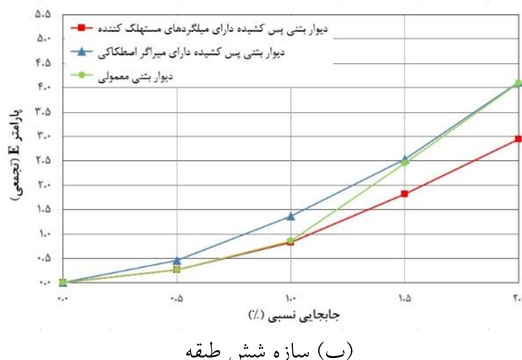


شکل ۱۸ منحنی‌های چرخه‌ای[29]

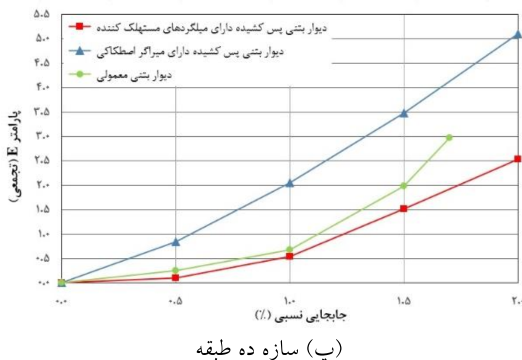
در ادامه برای مقایسه استهلاک انرژی در بارگذاری‌های چرخه‌ای مقادیر ضریب جذب انرژی به‌دست‌آمده برای مدل‌های مورد بررسی به‌صورت تجمعی برای جابه‌جایی‌های جانبی نسبی ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ درصد نمایش داده می‌شود.



(الف) سازه سه طبقه



(ب) سازه شش طبقه



(پ) سازه ده طبقه

شکل ۱۹ مقادیر ضریب جذب انرژی مدل‌های مورد بررسی به‌صورت تجمعی

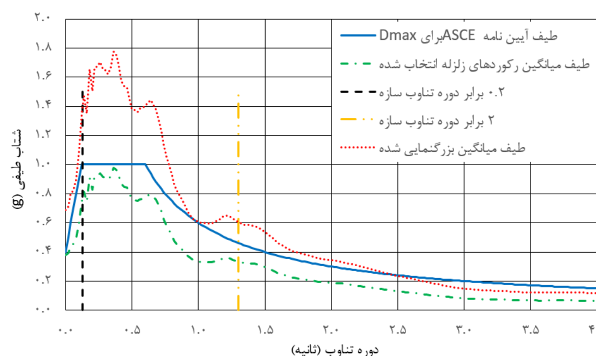
مطابق نتایج به‌دست‌آمده ضریب جذب انرژی تجمعی در چرخه‌های اول و دوم سیستم دیوار بتنی پس‌کشیده مرکزگرا دارای میراگر اصطکاکی در سازه‌های سه، شش و ده طبقه دارای مقادیر بالاتری نسبت‌به دو سیستم دیگر می‌باشد. در سازه شش طبقه در چرخه سوم و چهارم مقدار ضریب جذب انرژی تجمعی در سیستم‌های دیوار بتنی پس‌کشیده مرکزگرا دارای میراگر اصطکاکی و دیوار برشی بتنی معمولی تقریبا مساوی ولی بیشتر از ضریب جذب انرژی در سیستم دیوار بتنی پس‌کشیده مرکزگرا دارای میلگردهای مستهلک‌کننده می‌باشد. در سازه سه و ده طبقه ضریب جذب انرژی تجمعی در چرخه‌های سوم و چهارم سیستم دیوار بتنی پس‌کشیده مرکزگرا دارای میراگر اصطکاکی مقادیر بالاتری نسبت‌به دیوار برشی بتنی معمولی و سیستم دیوار برشی بتنی معمولی دارای مقادیر بیشتری نسبت‌به سیستم دیوار بتنی پس‌کشیده مرکزگرا دارای میلگردهای مستهلک‌کننده می‌باشد.

در ادامه به بررسی نتایج سازه‌های نسبت‌به شده تحت اثر تحلیل تاریخچه پاسخ می‌پردازیم. برای انجام این تحلیل از هفت رکورد معرفی شده در جدول (٥) استفاده شده‌است. رکوردهای زلزله از نوع دور از گسل و شرایط خاک D از آیین‌نامه FEMA-P695 انتخاب شده‌است[30].

جدول ٥ مشخصات رکوردهای زلزله انتخاب شده دور از گسل و شرایط خاک D [30]

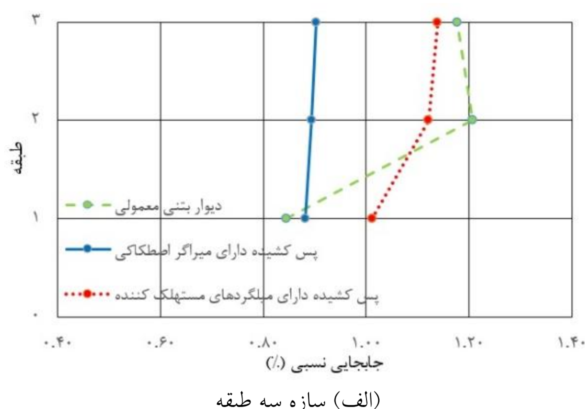
رکورد زلزله	ایستگاه رکورد	بزرگا	سال	PGA حداکثر (g)	PGV حداکثر (cm/s)
Northridge	Canyon Country	٦/٧	١٩٩٤	۰/٤٨	٤٥
Imperial Valley	Elcentro Array	٦/٥	١٩٧٩	۰/٣٨	٤٢
Kobe	Nishi-Akashi	٦/٩	١٩٩٥	۰/٥١	٣٧
Kocaeli	Duzce	٧/٥	١٩٩٩	۰/٣٦	٥٩
LomaPrieta	Capitola	٦/٩	١٩٨٩	۰/٥٣	٣٥
SuperStitions Hills	El Centro Imp. Co.	٦/٥	١٩٨٧	۰/٣٦	٤٦
SanFernando	LA Hollywood	٦/٦	١٩٧١	۰/٢١	١٩

برای مقیاس کردن رکوردهای زلزله انتخاب شده ابتدا طیف آیین‌نامه ASCE برای شرایط لرزه‌ای D_{max} رسم می‌شود. سپس طیف رکوردهای زلزله انتخاب شده را بدست آورده و میانگین آن‌ها مطابق شکل (٢٠) نمایش داده می‌شود.

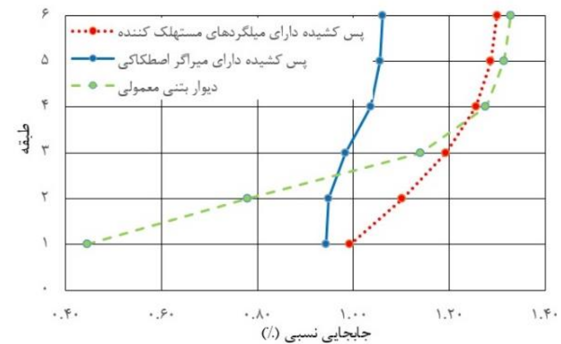


شکل ٢٠ طیف آیین نامه ASCE برای شرایط خاک D در برابر طیف میانگین زلزله انتخاب شده و طیف میانگین بزرگ‌نمایی شده برای سازه شش طبقه

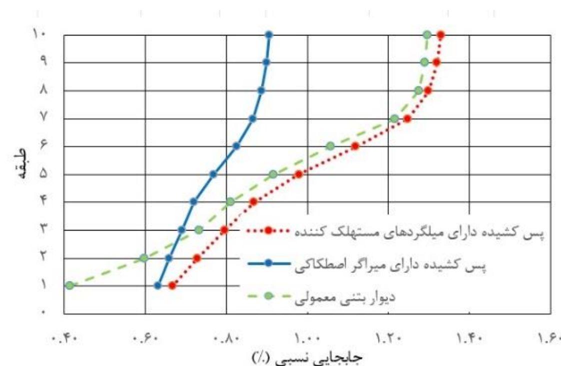
سپس برای سازه‌های سه، شش و ده طبقه با توجه به دوره تناوب اصلی سازه، طیف میانگین رکوردهای زلزله به نحوی مقیاس می‌شود که طیف میانگین در بازه ۰/٢ تا ٢ برابر دوره تناوب اصلی سازه بالاتر از طیف آیین‌نامه قرار گیرد. حال با داشتن این ضریب برای سازه‌های سه، شش و ده طبقه رکوردهای زلزله مقیاس شده به سازه‌ها اعمال می‌شوند[21]. با توجه به این نکته ضرایب بزرگنمایی رکوردهای زلزله برای سازه‌های سه طبقه، شش طبقه و ده طبقه به‌ترتیب برابر با ١,٦١، ١,٨١ و ١,٨١ به‌دست آمده‌است. پس از اعمال این رکوردها به سازه‌های سه، شش و ده طبقه، جابه‌جایی نسبی حداکثر هر طبقه ثبت می‌شود. میانگین مقادیر به‌دست آمده برای هفت رکورد زلزله برای سه سیستم دیوار بتنی پس‌کشیده مرکزگرا دارای میلگردهای مستهلک‌کننده، دیوار بتنی پس‌کشیده مرکزگرا دارای میراگر اصطکاکی و دیوار برشی بتنی معمولی در شکل (٢١) نشان داده شده‌است.



(الف) سازه سه طبقه



(ب) سازه شش طبقه



(پ) سازه ده طبقه

شکل ۲۱ میانگین جابه‌جایی جانبی نسبی حداکثر طبقات تحت اثر زلزله‌های اعمالی در سازه‌های نسبت‌به شده

مطابق نتایج به‌دست‌آمده در سازه سه طبقه مقدار میانگین جابه‌جایی جانبی نسبی حداکثر سیستم دیوار بتنی پس‌کشیده دارای میراگر اصطکاکی و دیوار برشی بتنی معمولی در طبقه اول تقریباً برابر (۰/۸۵ درصد) و کمتر از سیستم دیوار بتنی پس‌کشیده دارای میلگردهای مستهلک‌کننده می‌باشد. در طبقات دوم و سوم این مقدار برای دیوار برشی بتنی معمولی و سیستم دیوار بتنی پس‌کشیده دارای میلگردهای مستهلک‌کننده با یکدیگر تقریباً مساوی (بین ۱/۱ تا ۱/۲ درصد) ولی بیشتر از سیستم دیوار بتنی پس‌کشیده دارای میراگر اصطکاکی است.

در سازه شش طبقه مقدار میانگین جابه‌جایی جانبی نسبی حداکثر در طبقات پایین (اول و دوم) برای سیستم دیوار برشی بتنی معمولی کمتر از دو سیستم دیگر بوده، در حالی که در طبقات بالاتر (سوم تا ششم) سیستم دیوار بتنی پس‌کشیده دارای میراگر اصطکاکی مقادیر کمتری نسبت‌به دو سیستم دیگر دارد.

در سازه ده طبقه نیز در طبقات اول و دوم در سیستم دیوار برشی بتنی معمولی مقدار میانگین جابه‌جایی جانبی نسبی حداکثر کمتر از دو سیستم دیگر است. از طبقه سوم تا دهم سیستم دیوار بتنی پس‌کشیده دارای میراگر اصطکاکی مقادیر میانگین جابه‌جایی جانبی نسبی حداکثر کمتری نسبت‌به سیستم دیوار بتنی پس‌کشیده دارای میلگردهای مستهلک‌کننده و دیوار برشی بتنی معمولی دارد. در ادامه در جدول (۶) مقادیر میانگین برش پایه حداکثر تحت اثر هفت رکورد زلزله اعمالی برای سیستم‌های مختلف نمایش داده می‌شود.

جدول ۶ مقادیر میانگین برش پایه حداکثر سازه‌های نسبت‌به شده تحت اثر زلزله‌های اعمالی

سیستم نسبت‌به شده	میانگین برش پایه حداکثر (کیلونیوتن)		
	سه طبقه	شش طبقه	ده طبقه
دیوار بتنی پس کشیده دارای میلگردهای مستهلک‌کننده	۸۴۵/۹۹	۱۷۰۷/۵۹	۲۷۲۸/۸۳
دیوار بتنی پس کشیده دارای میراگر اصطکاکی	۸۳۱/۲۱	۱۶۷۹/۳۷	۲۲۰۸/۶۷
دیوار بتنی معمولی	۸۷۲/۵۵	۱۸۰۱/۰۱	۲۴۲۹/۸۹

مطابق نتایج جدول بالا مقادیر میانگین برش پایه حداکثر در سازه‌های سه، شش و ده طبقه دارای سیستم دیوار بتنی پس کشیده دارای میراگر اصطکاکی کمتر از سایر سیستم‌ها می‌باشد. هم‌چنین برش پایه میانگین دیوار بتنی پس کشیده دارای میلگردهای مستهلک‌کننده در سازه‌های سه و شش طبقه کمتر از سیستم دیوار بتنی معمولی و در سازه ده طبقه بیشتر از سیستم دیوار بتنی معمولی است. با توجه به یکسان بودن جرم طبقات در مدل‌های مورد بررسی، شتاب میانگین در طبقات سازه‌های دارای سیستم دیوار بتنی پس کشیده دارای میراگر اصطکاکی نسبت‌به سایر سیستم‌های کمتر می‌باشد.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه رفتار لرزه‌ای سیستم دیوار بتنی پس‌کشیده مرکزگرا دارای میراگر اصطکاکی با دو سیستم دیوار بتنی پس‌کشیده مرکزگرا دارای میلگردهای مستهلک‌کننده و دیوار برشی بتنی معمولی مقایسه شده‌است. برای این منظور سه سیستم مذکور به‌صورت قاب‌های سه، شش و ده طبقه در نرم افزار OpenSees نسبت‌به شدند و تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای و تحلیل تاریخچه پاسخ قرار گرفتند.

بر اساس نتایج حاصله سیستم دیوار بتنی پس‌کشیده مرکزگرا دارای میراگر اصطکاکی برخلاف دو سیستم دیگر دارای افت مقاومت کمتری در چرخه‌های مختلف بارگذاری چرخه‌ای بوده و مقاومت متناسب با دو درصد جابه‌جایی جانبی نسبی آن از دو سیستم دیگر بیشتر می‌باشد. هم‌چنین سیستم‌های دیوار بتنی پس‌کشیده دارای میراگر اصطکاکی و سیستم دیوار بتنی پس-کشیده دارای میلگردهای مستهلک‌کننده دارای رفتار مرکزگرا بوده و جابه‌جایی جانبی نسبی باقی‌مانده‌ی آن‌ها پس از هر چرخه بارگذاری تقریباً برابر با صفر است.

مطابق نتایج به‌دست آمده از سیستم دیوار بتنی پس‌کشیده مرکزگرا دارای میراگر اصطکاکی برای سازه‌های سه، شش و ده طبقه مقدار ضریب جذب انرژی در مجموع چرخه‌های اعمالی به‌ترتیب برابر با ۴/۸۹، ۴/۱۲ و ۵/۱۰ می‌باشد. این مقادیر برای سیستم دیوار بتنی پس‌کشیده مرکزگرا دارای میلگردهای مستهلک‌کننده به‌ترتیب برابر با ۳/۵۶، ۲/۹۴ و ۲/۵۳ و برای سیستم دیوار برشی بتنی معمولی به‌ترتیب برابر با ۴/۲۶، ۴/۱۰ و ۲/۹۷ است. این مقادیر نشان می‌دهد سیستم دیوار بتنی پس‌کشیده دارای میراگر اصطکاکی در مجموع جذب انرژی بالاتری نسبت‌به دو سیستم دیگر دارد. هم‌چنین سیستم دیوار برشی بتنی نیز نسبت‌به سیستم دیوار بتنی پس‌کشیده دارای میلگردهای مستهلک‌کننده جذب انرژی بیشتری در هر سه سازه سه، شش و ده طبقه دارد.

بر اساس نتایج میانگین جابه‌جایی جانبی نسبی حداکثر طبقات ناشی از هفت رکورد زلزله دور از گسل در سازه سه طبقه بازه تغییرات این مقدار برای سیستم دیوار بتنی پس‌کشیده دارای میراگر اصطکاکی از ۰/۸۷ تا ۰/۹۰ درصد بوده، در حالی که این بازه برای سیستم‌های دیوار بتنی پس‌کشیده دارای میلگردهای مستهلک‌کننده و دیوار برشی بتنی به‌ترتیب ۱/۰۱ تا ۱/۱۴ درصد و ۰/۸۴ تا ۱/۱۸ درصد است. برای سازه شش طبقه سیستم دیوار بتنی پس‌کشیده دارای میراگر اصطکاکی این بازه از ۰/۹۴ تا ۱/۰۶ درصد، سیستم دیوار بتنی پس‌کشیده دارای میلگردهای مستهلک‌کننده از ۰/۹۹ تا ۱/۳۰ درصد و سیستم دیوار برشی بتنی از ۰/۴۴ تا ۱/۳۳ درصد می‌باشد. هم‌چنین در سازه ده طبقه برای سه سیستم دیوار بتنی پس‌کشیده دارای میراگر اصطکاکی، سیستم دیوار بتنی پس‌کشیده دارای میلگردهای مستهلک‌کننده و سیستم دیوار برشی بتنی بازه تغییرات میانگین جابه‌جایی جانبی نسبی حداکثر طبقات به‌ترتیب از ۰/۶۳ تا ۰/۹۱، از ۰/۶۷ تا ۱/۳۳ و از ۰/۴۱ تا ۱/۳۰ درصد است. هم‌چنین مقادیر میانگین برش پایه حداکثر ناشی از هفت رکورد زلزله دور از گسل و در نتیجه شتاب حداکثر اعمالی در سازه‌های سه، شش و ده طبقه دارای سیستم دیوار بتنی پس کشیده دارای میراگر اصطکاکی کمتر از دو سیستم دیگر می‌باشد.

پس از وقوع زلزله، در سیستم دیوار بتنی پس‌کشیده دارای میراگر اصطکاکی نسبت‌به سیستم دیوار بتنی پس‌کشیده دارای میلگردهای مستهلک‌کننده و سیستم دیوار برشی بتنی، امکان تعویض میراگرهای آسیب‌دیده و استفاده مجدد از این سیستم با کمترین هزینه تعمیر می‌باشد.

مراجع

1. Priestley, M.J.N. and Tao, J.R.T., "Seismic Response of Precast Prestressed Concrete Frames with Partially Debonded Tendons", *PCI Journal*, Vol. 38(1), pp. 58-69, (1993).
2. Stanton, J., Stone, W. and Cheok, G.S., "A Hybrid Reinforced Precast Frame for Seismic Regions", *PCI Journal*, Vol. 42(2), pp. 20-32, (1997).
3. Stanton, J.F. and Nakaki, S.D., "Design Guidelines for Precast Concrete Structural Systems", *PRESSS Report No. 01/03-09*, (2002).
4. Restrepo, J.I., "New Generation of Earthquake Resisting Systems", P*roceeding of The first FIB Congress, Federation International du Béton*, Osaka-Japan, P. E-268, (2002).
5. Erkmen, B. and Schultz, A. E., "Self-centering behavior of unbonded precast concrete shear walls", *Earthquake Resistant Engineering Structures VI*, Vol. 93, pp. 185-194, (2007).

6. Erkmen, B. and Schultz, A. E., "Self-Centering Behavior of Unbonded Post-Tensioned Precast Concrete Shear Walls", *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 13(7), pp. 1047-1064, (2009).
7. Khanmohammadi, M. and Heydari, S., "Seismic behavior improvement of reinforced concrete shear wall buildings using multiple rocking systems", *Engineering Structures*, Vol. 100, pp. 577–589, (2015).
8. Shahpouri, F. and Tasnimi, A., "Numerical analysis of prefabricated reinforced concrete shear wall with self-centering system ", *10th international congress on civil engineering, University of tabriz*, (2015) (in persian).
9. Guo, T., Zhang, G. and Chen, Ch., "Experimental Study on Self-Centering Concrete Wall with Distributed Friction Devices", *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 18(2), pp. 214-230, (2014).
10. Henry, R.S., Sritharan, S. and Ingham, J. M., "Finite element analysis of the PreWEC self-centering concrete wall system", *Engineering Structures*, Vol. 115, pp. 28–41, (2016).
11. Guo, T., Xu, Zh., Song, L., Wang, L. and Zhang, Zh., "Seismic Resilience Upgrade of RC Frame Building Using Self-Centering Concrete Walls with Distributed Friction Devices", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 143(12), pp. 1–11, (2017).
12. Shahpouri, F. and Tasnimi, A., " Nonlinear numerical analysis of RC precast shear walls with self-centering system", *Sharif Journal of Civil Engineering*, Vol. 34.2, pp. 13–24, (2018) (In Persian).
13. Wang, B. and Zhu, S., "Seismic behavior of self-centering reinforced concrete wall enabled by superelastic shape memory alloy bars", *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 16(1), pp. 479–502, (2018).
14. Guo, T., Wang, L., Xu, Zh. and Hao, Y., "Experimental and numerical investigation of jointed self-centering concrete walls with friction connectors", *Engineering Structures*, Vol. 161, pp. 192–206, (2018).
15. Zhai, Zh., Guo, W., Yu, Zh., He, Ch. and Zeng, Zh., "Experimental and numerical study of S-shaped steel plate damper for seismic resilient application", *Engineering Structures*, Vol. 221, pp. 1–17, (2020).
16. Shirinkam, MR. and Razzaghi, J., "Experimental and analytical investigation on the behavior of metallic Box- Shaped Dampers (BSD)", *Structures*, Vol. 23, pp. 766–778, (2020).
17. Xiao, Sh., Xu, L. and Li, Zh., "Development and experimental verification of self-centering shear walls with disc spring devices", *Engineering Structures*, Vol. 213, pp. 1–14, (2020).
18. Xiao, Sh., Xu, L. and Li, Zh., "Design and experimental verification of disc spring devices in self-centering reinforced concrete shear walls", *Structural Control and Health Monitoring*, Vol. 27(7), pp. 1–19, (2020).
19. Du, X., Wang, Zh., Liu, H. and Liu, M., "Research on seismic behavior of precast self-centering concrete walls with dry slip-friction connectors", *Journal of Building Engineering*, Vol. 42, (2021).
20. Heyrani Moghaddam, S. and Shooshtari, A., "Nonlinear static and dynamic behaviors assessment of self-centering post-tensioned concrete wall with multiple-slit device", *Journal of Building Engineering*, Vol. 43, (2021).
21. American Society of Civil Engineers (ASCE), "Minimum design loads for buildings and other structures", *ASCE 07*, Reston, VA.
22. American Institute of Steel Construction (AISC), "Specification for Structural Steel Buildings", *AISC 360*.
23. Yang, B. and Lu, X., "Displacement-Based Seismic Design Approach for Prestressed Precast Concrete Shear Walls and its Application", *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 22(10), pp. 1836-1860, (2017).

24. McKenna, F., Fenves, G. and Scott, M., "Open system for earthquake engineering simulation", Berkeley, CA: University of California, http://opensees.berkeley.edu., (2000)

25. Dal Lago, B., Biondini, F. and Toniolo, G., "Friction-based dissipative devices for precast concrete panels", *Engineering Structures*, Vol. 147, pp. 356–371, (2017).

26. Lu, X., Xie, L., Guan, H., Huang, Y. and Lu, X., "A shear wall element for nonlinear seismic analysis of super-tall buildings using OpenSees", *Griffith School of Engineering*, (2015).

27. Restrepo, J. and Rahman, A., "Seismic Performance of Self-Centering Structural Walls Incorporating Energy Dissipators", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 133(11) pp. 1560-1570, (2007).

28. Rahman, A. and Restrepo, J., "Earthquake Resistant Precast Concrete Buildings: Seismic Performance of Cantilever Walls Prestressed using Unbonded Tendons", *Research Report, University of Canterbury Christchurch*, New Zealand, (2000).

29. Lu, J., Yu, Sh., Xia, J., Qiao, X. and Tang, Y., "Experimental study on the hysteretic behavior of steel plate shear wall with unequal length slits", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 147, pp. 477–487, (2018).

30. Applied Technology Council "Quantification of Building Seismic Performance Factors - FEMA P695", *Federal Emergency Management Agency (FEMA)*, (2009).